

УДК 622.831

Старотиторов И.Ю., асп., НГУ, г. Днепропетровск, Украина

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В ОБЪЕМНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ НА ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ

**Общие положения.** Оценка прочности твердых тел в объемном напряженном состоянии может быть выполнена на основе той или иной теории прочности [1, 2, 3]. В механике горных пород наибольшее распространение получила теория прочности О. Мора, которая полностью базируется на экспериментальных данных, и ее модификации [1].

Имея хорошо обоснованное условие прочности, можно изучать процесс разрушения горных пород на численных моделях. Такие модели исследуются при помощи программных комплексов, в основе которых лежит один из численных методов. Как правило, это метод конечных элементов (МКЭ) [4].

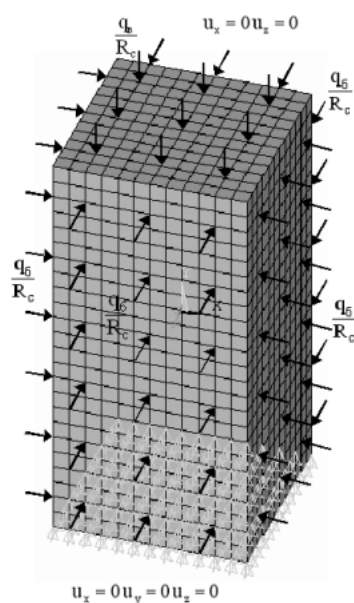


Рис. 1. Конечно-элементная модель породного образца

**Методика испытания численной модели.** Для изучения прочностных характеристик горных пород в объемном напряженном состоянии была разработана объемная конечно-элементная модель породного образца (рис. 1). Образец полагался изотропным, однородным и линейно-упругим. Его размеры – 50х50х100 мм.

На численной модели по определенной методике имитировался процесс разрушения породного образца в условиях трехосного сжатия при следующем соотношении компонентов главных напряжений: Такое соотношение имитируется в процессе нагружения и разрушения породного образца в приборе Кармана [1].

В процессе исследований к верхней и боковым граням модели прикладывалась распределенная нагрузка, которая для упрощения расчетов задавалась в долях от предполагаемого предела прочности материала образца на одноосное сжатие. На каждом этапе нагружения выполнялась оценка напряженно-деформированного состояния образца в соответствии с принятой теорией прочности и определялся уровень разрушающей нагрузки, вызывающей переход материала образца в стадию неупругого деформирования.

Полагалось, что модель разрушится в том случае, когда во всех элементах конечно-элементной сетки выполнится условие:

$$\frac{\sigma_e}{R_c} \geq 1.$$

Здесь  $\sigma_e$  – эквивалентные напряжения, действующие в точке массива;  $R_c$  – предел прочности пород на одноосное сжатие.

Для вычисления эквивалентного напряжения в данной работе использовались критерий прочности Л.Я. Парчевского – А.Н. Шашенко [1]

$$\sigma_e = \frac{(\psi - 1)(\sigma_1 + \sigma_3) + \sqrt{(1 - \psi)^2(\sigma_1 + \sigma_3)^2 + 4\psi(\sigma_1 - \sigma_3)^2}}{2\psi} \leq R_c \quad (1)$$

и критерий прочности П.П. Баландина [2]

$$\sigma_e = \frac{(\psi - 1)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) + \sqrt{(1 - \psi)^2(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 + 2\psi((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)}}{2\psi} \leq R_c \quad (2)$$

где  $\psi = \frac{R_p}{R_c}$  – коэффициент хрупкости горных пород ( $\psi = 1$  – соответствует понятию идеальной пластичности,  $\psi = 0$  – идеальной хрупкости);  $R_p$  – предел прочности на растяжение;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения.

Как видно из приведенных выше выражений, первый критерий учитывает только два компонента главных напряжений (наибольшее и наименьшее), в то время как во втором присутствуют все три главных напряжения.

**Анализ полученных результатов.** По описанной выше методике были выполнены испытания численной модели породного образца при различных значениях безразмерной нагрузки, действующей на ее боковые грани  $\frac{q_0}{R_c}$ , величина которой варьировалась в диапазоне от 0 до 0,8 с шагом 0,1.

В результате проведенных испытаний для каждого критерия были получены значения максимальных и минимальных главных напряжений, по которым были построены предельные круги Мора и огибающие к ним для хрупких горных пород с коэффициентом  $\psi = 0,1$  (рис. 2). Полученные кривые сравнивались с экспериментальными кривыми, построенными для аргиллита, алевролита и песчаника. Данные для построения экспериментальных кривых были взяты у А.Н. Ставрогина, который получил их в результате лабораторных испытаний породных образцов [5].

Как видно из рисунка, кривые, соответствующие критериям прочности, в целом, расположились немного ниже экспериментальных. Это говорит о том,

что оба критерия позволяют прогнозировать прочность хрупких горных пород с некоторым заранее заложенным в структуре формул запасом прочности. При этом критерий прочности Л.Я. Парчевского – А.Н. Шашенко является более удобным в аналитических расчетах при решении плоских задач геомеханики, поскольку он симметричен по отношению к компонентам напряжений. Для решения же объемных задач следует использовать критерий прочности П.П. Баландина.

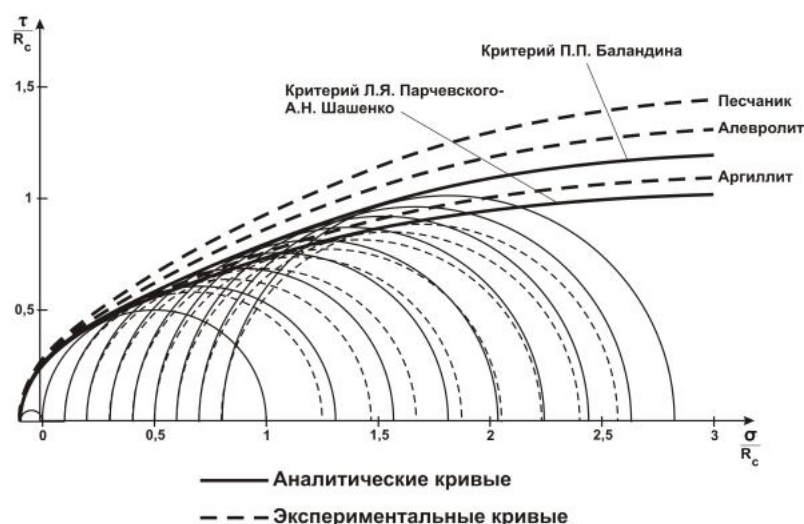


Рис. 2. Огибающие кругов Мора, построенные по аналитическим (1), (2) и экспериментальным данным [5]

По этой же методике был выполнен ряд дополнительных испытаний численной модели, но уже для крайних случаев, т.е. для идеально хрупких и идеально пластичных горных пород. Условия прочности (1) и (2) для этих случаев соответственно имеют следующие выражения:

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{(\sigma_1 + \sigma_3)} \leq R_c \text{ when } \psi = 0; \quad (3)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3) \leq R_c \text{ when } \psi = 1. \quad (4)$$

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{(\sigma_1 + 2\sigma_3)} \leq R_c \text{ when } \psi = 0; \quad (5)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3) \leq R_c \text{ when } \psi = 1. \quad (6)$$

Полученные результаты численного моделирования (а именно значения максимальных и минимальных главных напряжений) были сопоставлены с известными аналитическими и экспериментальными данными (рис. 3). В качестве последних использованы результаты лабораторных испытаний горных пород, полученные А.Н. Ставрогиным [5].

Как следует из рисунка, результаты численного моделирования процесса разрушения горных пород в объемном напряженном состоянии достаточно хо-

рошо совпадают с результатами аналитических и экспериментальных исследований.

Таким образом, исследуемая численная модель адекватно отражает явление разрушения горных пород в объемном напряженном состоянии, а сам метод вполне может быть использован при решении задач геомеханики.

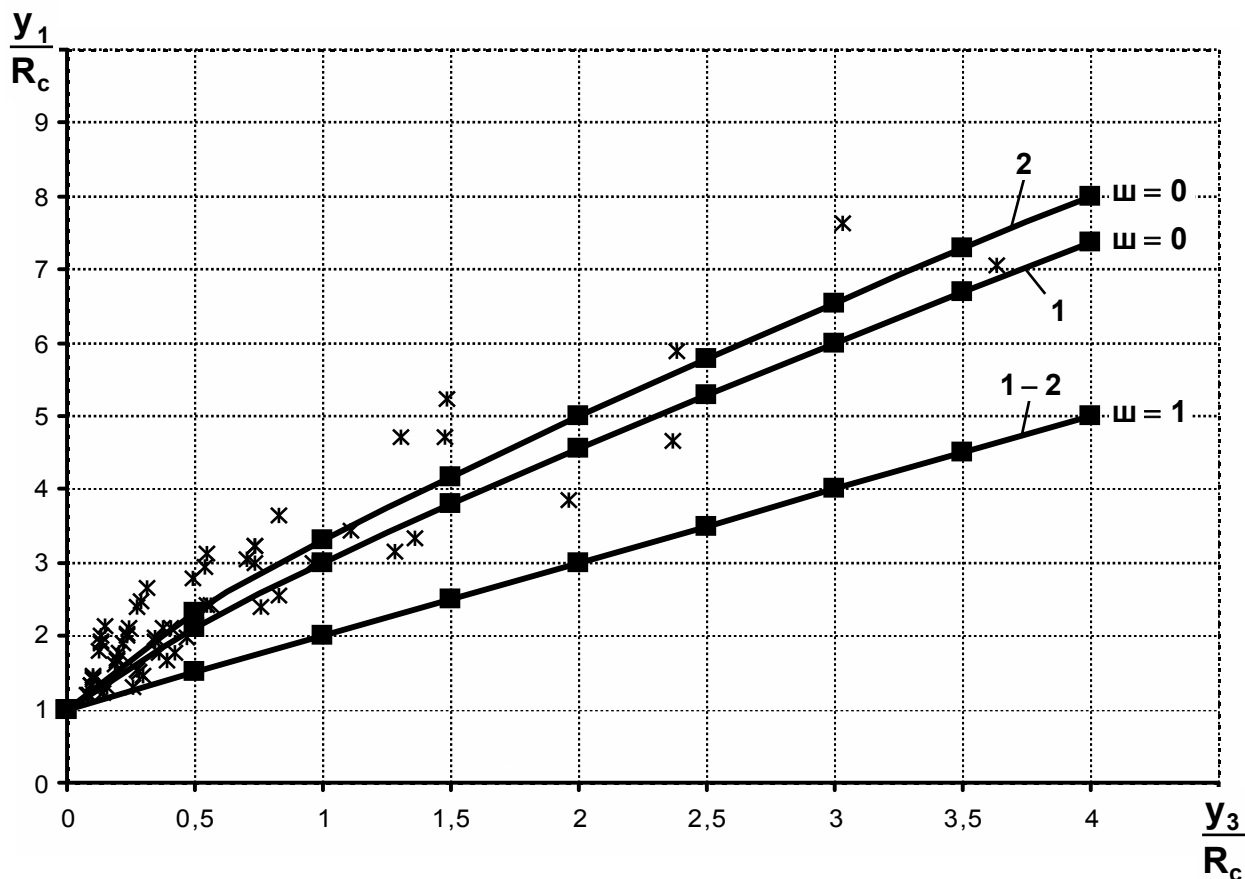


Рис. 3. Сравнение результатов численного моделирования (■) с аналитическими (3), (4), (5), (6) и экспериментальными [5] данными: 1 – критерий Л.Я. Парчевского – А.Н. Шашенко; 2 – критерий П.П. Баландина

## ВЫВОДЫ

1. Выполнено численное моделирование процесса разрушения горных пород в объемном напряженном состоянии используя аналитические критерии прочности Л.Я. Парчевского – А.Н. Шашенко и П.П. Баландина. Причем, если первый критерий получен в предположении, что прочность горных пород зависит, прежде всего, от соотношения между наибольшим и наименьшим главными напряжениями, то второй учитывает все три компонента главных напряжений.

2. Разработанная численная модель позволила достаточно хорошо описать процесс разрушения горных пород в объемном напряженном состоянии и при этом полученные результаты численного моделирования показали неплохую сходимость с аналитическими и экспериментальными данными.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шашенко А.Н., Пустовойтенко В.П. Механика горных пород: Учебник для вузов. – К.: Новый друк, 2003. – 400 с.
2. Расчеты на прочность в машиностроении/ Пономарев С.Д., Бидерман В.Л. и др. – Москва: МАШГИЗ, 1956. Том I. – 884 с.
3. Дидык Р.П., Кузнецов Е.В., Забара В.Н. Физические основы прочности. Учебник. – Д.: Наука и образование, 2005. – 608 с.
4. Фадеев А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 236 с.
5. Ставрогин А. Н., Протосеня А.Г. Пластичность горных пород. – М.: Недра, 1979. – 301 с.

УДК 622.258

*Прокопов А.Ю., Склепчук В.Л., Тимофеев Д.Н.,  
Шахтинский институт ЮРГТУ(НПИ)*

**ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ  
ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОХОДКЕ  
ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ ПОДЗЕМНОГО РУДНИКА «УДАЧНЫЙ»  
В ЗОНЕ НЕФТЕГАЗОПРОЯВЛЕНИЙ**

Кимберлитовая трубка «Удачная» находится на площади Далдынского кимберлитового поля в северной части Далдынского-Алакитского алмазоносного района. Разработка верхних горизонтов месторождения осуществляется открытым способом с 1973 г. Проектная глубина карьера составляет 600 м (абс. отм. дна -290 м). К настоящему времени карьером вскрыт горизонт -170 м, а глубина достигает 470-520 м. С целью дальнейшей разработки месторождения подземным способом был разработан проект строительства подземного рудника «Удачный», предусматривающий схему вскрытия тремя вертикальными стволами: скиповым, клетевым и вентиляционно-вспомогательным глубиной соответственно 1046, 959 и 997,5 м.

Вентиляционно-вспомогательный ствол диаметром в свету 8 м оборудуется 2 грузовыми клетями 31НВ-4,5А грузоподъемностью 13,5 т (на 30 человек) и противовесами и предназначен для подачи свежего воздуха, спуска-подъема отдельных грузов, материалов и аварийного выхода для людей, а также обслуживания подземного комплекса дробления.

Проходка ствола осуществлялась буровзрывным способом по совмещенной схеме с использованием металлического проходческого копра «Север», пере-